

## 测试分析

# 涂层附着力测试方法分析比较

江水旺,陶乃旺,王华清(中国船舶重工集团公司第七二五研究所厦门分部,福建厦门 361101)

**摘要:**对现有涂层附着力测试方法(划格法、划叉法、划圈法、拉开法)的差异性进行了分析比较。试验结果表明:划格法、划叉法与划圈法能直观反映涂层附着力,测试结果重复性也较好,但由于测试结果只是以“级”表示,无法提供更精确的量值,存在一定的局限性。采用拉开法进行附着力测试,单试柱法测试结果显著小于双试柱法。单试柱法数据分布范围更窄,标准偏差及数据离散性也较小,测试结果重复性更好。

**关键词:**涂料;附着力;测试方法

**中图分类号:** TQ 630.7+2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-1696(2015)07-0038-05

## 0 引言

涂料作为一种保护和装饰材料广泛应用于家装、汽车、工业、海洋等各个领域,在现代生活中发挥着重要的作用。涂料发挥作用的前提是涂膜能牢固地附着在物体表面上,因此附着力大小是衡量涂料性能的一项重要指标。

涂层附着力是指涂膜与被涂物体表面之间通过物理或化学作用相互黏结的能力,是一种界面作用力,包括涂层与基体表面(包括金属、混凝土、塑料等)的黏附力及涂层本身的内聚力。

对于涂层附着力,大部分涂料产品都有指标规定。以海洋涂料为例,国际海事组织海上安全委员会于2006年通过的强制性规范MSC.215(82)《所有类型船舶专用海水压载舱和散货船双舷侧处所保护涂层性能标准》要求船舶压载舱涂层内聚力 $3.5\text{ MPa}$ ,环氧压载舱主涂层与车间底漆层间附着力 $3.0\text{ MPa}$ ,或替代体系附着力 $5.0\text{ MPa}$ ;NORSOK M501:2012《表面处理和防护涂层》对海洋平台各个部位的防护涂层进行了规定,如用于大气区、温度小于 $120^\circ\text{C}$ 的

钢结构外表面的涂层附着力 $5.0\text{ MPa}$ ;GB/T 6747—2007《船用车间底漆》要求车间底漆附着力2级等等。通过对各种涂料技术规范的研究发现:不同涂料产品的附着力测试方法及指标要求不尽相同。同时在实际测试过程中,同一种涂料产品选择不同测试方法或使用不同测试设备会得出截然不同的测试结果,并且由于附着力测试结果有多种表示方法,各种表示方法之间亦无关联对比性,这些都易在实际操作过程中给涂料工作者带来困惑,也不利于涂料产品之间的性能比较。本研究采用几种常见的附着力测试方法,如划格法、划叉法、划圈法、拉开法等测试两种不同涂层的附着力,通过对测试结果进行比较分析,为涂层附着力测试方法的选择提供参考。

## 1 现行附着力测试方法

现行附着力测试方法主要有ASTM D 4541—2009《采用便携式附着力测试仪进行拉脱试验的标准试验方法》(便携式拉开法)、ASTM D 3359—2009《通过胶带试验测定附着力》(划叉法)、GB/T 5210—2006

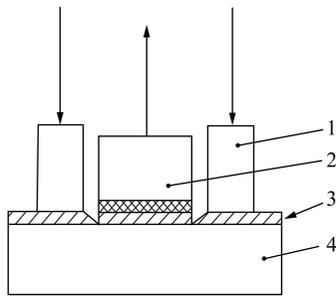
[收稿日期] 2015-05-13

[作者简介] 江水旺(1985—),男,工程师,主要从事船舶涂料分析检测与研发工作。

《色漆和清漆 拉开法附着力试验》(等同采用 ISO 4624—2002《色漆和清漆 拉开法附着力测试》(拉开法) GB/T 1720—1979《漆膜附着力测定法》(划圈法) GB/T 9286—1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》(等同采用 ISO 2409—1992《色漆和清漆 交叉切割实验》(划格法))

拉开法是通过胶黏剂将试板或试柱上的涂层面与另一个试柱上的涂层相黏结,通过液压或机械方法测定涂层垂直向上的应力大小,并以测得的单位面积的拉力大小表示涂层附着力。表示方法为  $F=G/S$ , 式中  $F$  为附着力,单位为 MPa ;  $G$  为涂层破坏时的力,单位为 N ;  $S$  为试柱面积,单位为  $\text{cm}^2$ 。拉开法测试时,试柱直径一般为 20 mm 或 14 mm ,拉开速度  $1 \text{ MPa/s}^{[1]}$ 。此种方法可以测定单涂层体系或多涂层体系的附着力,结果以数值和涂层破坏形式相结合表示,通过分析结果数值和涂层的破坏形式,可以判断涂层体系中各道涂层的附着力差异。

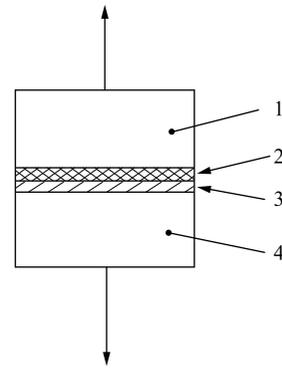
3 种常见的拉开法附着力试验组合图见图 1~3。



1—外圆环 ;2—涂有胶黏剂的试柱 ;3—涂层 ;4—底材

图 1 坚硬底材的试验组合(单试柱法)图

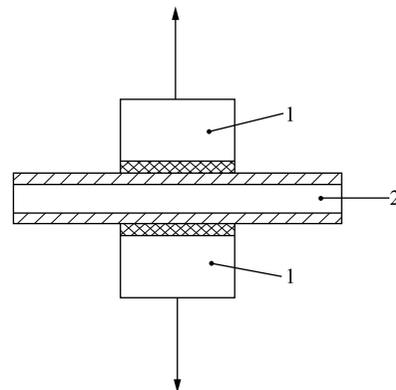
Figure 1 The test assembly chart for the rigid substrate (single column)



1—涂漆试柱 ;2—漆膜 ;3—胶黏剂 ;4—涂有胶黏剂的试柱

图 2 仅使用试柱的试验组合(双试柱法)图

Figure 2 The test assembly chart only using the test column (double column)



1—涂有胶黏剂的试柱 ;2—单面或双面涂漆的底材

图 3 夹层式试验的试验组合(夹层法)图

Figure 3 The test assembly chart for the sandwich test

划格法是采用切割刀具以直角网格图形切割涂层穿透至底材来评定涂层从底材上脱离的抗性的一种试验方法,其结果评价方法通过涂层脱离面积来评定,切割的间距取决于涂层厚度和底材类型<sup>[2]</sup>。漆膜划格法的评级方法见表 1。

表 1 漆膜划格试验评级方法

Table 1 The rating method of film cross-hatch test

分级/级	说明	切割区的表面外观
0	切割边缘完全平滑,无一格脱落	—
1	在切口交叉处有少许涂层脱落,但受影响的交叉切割面积不能明显大于 5%	
2	在切口交叉处和/或沿切口边缘有涂层脱落,受影响的交叉切割面积明显大于 5%,但不能明显大于 15%	
3	涂层沿切割边缘部分或全部以大碎片脱落,和/或在格子不同部位上部分或全部剥落,受影响的交叉切割面积明显大于 15%,但不能明显大于 35%	
4	涂层沿切割边缘以大碎片脱落,和/或在格子不同部位上部分或全部出现脱落。受影响的交叉切割面积明显大于 35%,但不能明显大于 65%	
5	剥落的程度超过 4 级	

划圈法是采用尖角唱针穿透至底材的前提下,施以一定荷重,在以一定的回转直径划圈的同时匀速运动,根据划圈对漆膜的破坏面积来对附着力结果进行评价的方法。划圈法结果评价方法为:以样板上划痕的上侧为检查目标,依次标出1、2、3、4、5、6、7共7个部位,相应分为7个等级,如图4所示。按顺序检查各部位漆膜的完整程度,如某一部位的格子有70%以上完好,则认定该部位是完好的,否则应认定为损坏<sup>[3]</sup>。

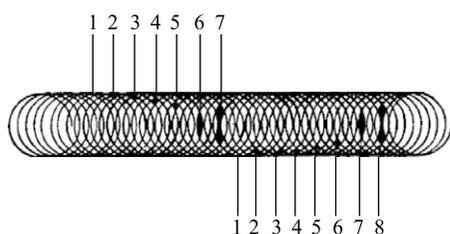


图4 漆膜划圈试验评级方法

Figure 4 The rating method of film circle-drawing test

划叉法是利用切割刀具,在完好的漆膜表面划两条交叉的各40 mm长的直线,交叉角度为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,并且切透至底材。利用压敏胶带粘贴切割位置,撕拉后检查划叉区域的漆膜脱落情况<sup>[4]</sup>,其结果的评价方法见表2。

表2 漆膜划叉法试验评级方法

Table 2 The rating method of film cross-cut test

分级	说明
5A	没有剥落
4A	在交叉处有剥落的痕迹
3A	在交叉到另一面1.6 mm处,有锯齿状剥落切口
2A	在交叉到另一面3.2 mm处,有锯齿状剥落切口
1A	在划叉区域大面积剥落
0A	在划叉区域全部剥落

如上所述,拉开法(包括便携式拉开法)测试结果不仅能直观反映涂层附着力实际力值大小,还可通过分析涂层破坏形式来发现涂层配套是否合理,可全面评价涂层体系的附着效果。目前此方法已成为涂料研制过程中配方筛选、工程现场涂装质量检查等采用的主要方法。但除便携式附着力测试仪外,一般材料力学试验机体积较大,不适合于现场检测。划叉法、划格法与划圈法都属于间接附着力测试方

法,无法直接读出附着力的实际数值,但能发现涂层在外力作用下的破坏情况,这三种方法除了对漆膜厚度要求有所区别之外,其测试过程及结果评价方法类似。由于划圈法附着力测试仪的工作原理的特殊性及体积较大,只能在实验室内使用。而划格法、划叉法的设备体积小,易携带且操作简便,适合于在工程现场进行涂装质量检测。

## 2 试验部分

根据标准规定分别选用马口铁板、喷砂钢板及试柱,喷砂钢板及试柱的表面处理等级符合GB/T 8923—1988规定的Sa 2½级,表面粗糙度达到GB/T 13288.1—2008规定的Ry(40~70)μm。

选取氯化橡胶涂料和环氧涂料作为附着力测试用涂料。按照GB/T 1727—1992《漆膜一般制备法》规定制备漆膜,试柱及钢板上的干膜厚度为(50±5)μm,马口铁板上的干膜厚度为(23±3)μm及(100±5)μm,于温度(23±2)℃,相对湿度(50±5)%的条件下养护7 d后,分别按照标准GB/T 5210—2006、GB/T 9286—1998、GB/T 1720—1979、ASTM D 3359—2009中规定的方法进行附着力测试。

双试柱拉开法测试采用WDT-20万能拉力试验机,单试柱拉开法测试采用Defelsko Positest AT-A液压附着力测试仪;划格法测试采用Elcometer107漆膜划格器;划圈法测试采用QFD电动划圈法附着力测试仪;划叉法测试采用手工操作。

## 3 结果与讨论

### 3.1 划格法、划叉法与划圈法比较

划格法、划叉法与划圈法属于间接法测定附着力,这三种方法都是以破坏面积来评判结果等级。分别对氯化橡胶涂料和环氧涂料进行划格法、划叉法和划圈法附着力测试,结果如表3和表4所示。

由表3、表4可见:当涂层厚度为23 μm时,氯化橡胶和环氧涂层的划格法、划叉法与划圈法测试结果相似;当涂层厚度增大到100 μm时,这三种测试方法都能反映涂层厚度增加对附着力的影响。

另外,这三种附着力测试方法均是以破坏面积作为结果的评判依据,试验过程影响因素较少,重复性较好。

表 3 膜厚为 23 μm 时划格法、划叉法和划圈法的测试结果

Table 3 The test results of cross-hatch ,cross-cut and circle-drawing for the film thickness 23 μm

漆膜类型	试验方法	测试结果/级					
氯化橡胶	划圈法	2	2	1	2	2	1
	划格法	3	2	2	1	2	2
	划叉法	3A	3A	2A	3A	3A	2A
环氧	划圈法	1	1	2	1	2	1
	划格法	1	0	1	1	0	1
	划叉法	4A	5A	5A	4A	5A	5A

表 4 膜厚为 100 μm 时划格法、划叉法和划圈法的测试结果

Table 4 The test results of cross-hatch ,cross-cut and circle-drawing for the film thickness 100 μm

漆膜类型	试验方法	测试结果/级					
氯化橡胶	划圈法	3	3	4	3	4	3
	划格法	3	4	3	3	3	4
	划叉法	2A	2A	1A	2A	1A	2A
环氧	划圈法	2	2	3	2	2	3
	划格法	2	2	2	3	2	2
	划叉法	4A	4A	3A	4A	4A	3A

### 3.2 单试柱法与双试柱法比较

单试柱法与双试柱法都属于直接法测定附着力,考察的是测试区域可承受垂直向上的使试柱与测试面分离的最大拉力,试验结果不仅取决于涂层自身的力学性能,而且与底材的表面处理、仪器参数设置、胶黏剂选用等都有很大的关系。

对于工程现场涂装质量检测,由于无法使用大型实验室设备,采用便携式液压附着力测试仪进行测试是通用做法。在日常实验室测试中,虽然各个产品标准或规范都规定要进行附着力测试,但是大部分标准并没有明确要求指明采用哪种方法,采用单试柱法或双试柱法进行测试均可。然而在实际检测中发现,同种涂层在相同的测试条件下,采用这两种方法测得的附着力存在明显的差别。

分别对氯化橡胶涂层和环氧涂层两种涂层进行附着力试验,根据所测得的附着力数值,绘制频率直方图及正态分布图,如图 5、图 6 所示。

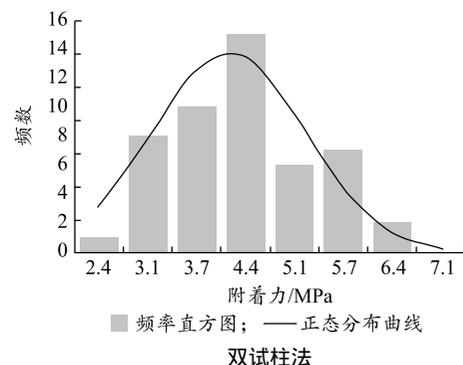
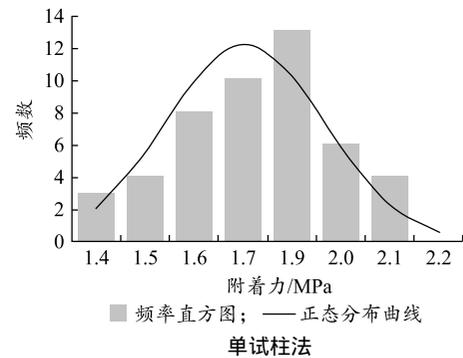


图 5 氯化橡胶涂层单试柱法与双试柱法附着力测试结果分布图

Figure 5 The distribution map of adhesion test results of chlorinated rubber coating by the single column and double column methods

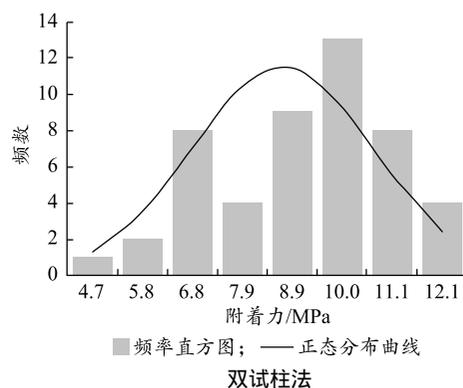
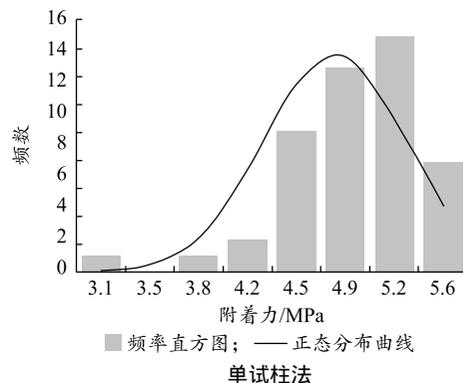


图 6 环氧涂层单试柱法与双试柱法附着力测试结果分布图  
Figure 6 The distribution map of adhesion test results of epoxy coating by the single column and double column methods

频率直方图横坐标表示附着力测试结果,纵坐标表示该数值出现的次数,氯化橡胶涂层及环氧涂层单试柱法及双试柱法测试次数(即测试样品数量)均为 50 次。由图 5 及图 6 可见:氯化橡胶涂层单试柱法及双试柱法附着力测试结果范围分别为 1.4~2.1 MPa, 2.4~6.4 MPa;环氧涂层为 3.1~5.6 MPa, 4.7~12.1 MPa。可以看出单试柱法的附着力测试结果分布范围更窄。这两种涂层单试柱法附着力测试结果标准偏差分别为 0.18 MPa 和 0.51 MPa;双试柱法附着力测试结果标准偏差分别为 1.03 MPa 和 1.91 MPa,单试柱法附着力测试结果标准偏差较小,对应的正态分布曲线相对较陡峭,而双试柱法标准偏差较大,对应曲线较平坦,说明单试柱法比双试柱法试验结果数据离散性更好。这可能是双试柱法在两个试柱粘接过程中,由于试柱间产生一定的位置偏移而不完全对中等的影响,使得测试过程向上的拉力不一定完全垂直于涂层界面,即产生了剪切力,从而使得数据分散性较大。另外,两种方法的测试结果存在显著差异。氯化橡胶涂层双试柱法附着力平均值为 4.2 MPa,单试柱法附着力平均值为 1.7 MPa,两种方法附着力平均值比值为 2.5;环氧涂层双试柱法附着力平均值为 8.9 MPa,单试柱法附着力平均值为 4.9 MPa,两种方法附着力平均值比值为 1.8。这可能是由于测试仪器工作原理差异造成的结果差异。

对于大多数工程现场检测或某些专用试验,如

国际海事组织压载舱涂料 PSPC 试验等,主要采用单试柱法进行涂层附着力测试,而对产品进行型式检验或鉴定检验时,一般采用双试柱法。可以看出,即使是相同的测试方法,由于采用的测试设备不同,测试结果也有很大差异。因此,为了避免由于测试方法或设备不明确而导致测试结果的差异,相关的产品标准或鉴定大纲中应明确规定采用何种方法进行附着力测试。

#### 4 结语

(1) 划圈法、划格法、划叉法均能直观反映涂层附着力,测试过程影响因素较少,测试结果重复性较好。但由于这 3 种方法测试结果只是以“级”表示,无法提供更精确的量值,存在一定的局限性。相对于划格法及划叉法,划圈法附着力测试仪体积较大,且操作复杂,无法用于工程现场涂层附着力测试。

(2) 采用拉开法进行附着力测试,单试柱法测试结果显著小于双试柱法。由于双试柱法在操作过程中试柱间可能产生位置偏移及剪切力等影响,使得测试数据分散性较大。单试柱法数据分布范围更窄,标准偏差及数据离散性也较小,测试结果重复性更好。另外,单试柱法便携式测试设备由于体积小、携带方便,适合于现场工程涂装检测。

### The Analysis and Comparison of Coating Adhesion Test Methods

Jiang Shuiwang, Tao Naiwang, Wang Huaqing

(Xiamen Branch of Luoyang Ship Material Research Institute, Fujian Xiamen, 361101, China)

**Abstract**: The differences of existing coating adhesion test methods, such as the cross-hatch, cross-cut, circle-drawing and pull-off methods were analyzed and compared. The results showed that cross-hatch, cross-cut and circle-drawing methods could reflect adhesion test results visually and have good repeatability. However, since these three test methods only show results of “grade”, they could not provide more accurate value. For pull-off test, adhesion results acquired by the single column method is significantly smaller than that of double column method. The data distribution, standard deviation and discretization also show that repeatability of single column method is better than double column.

**Key Words**: coatings; adhesion; test method